

Акустические приборы и системы

УДК 534.134

С.А. Найда, д-р техн. наук

Объективная аудиометрия слуха человека

Предложены аналитические соотношения для клинической диагностики и аудиометрии слуха человека на основе полученной автором формулы для параметра нормы среднего уха. Предложен простой метод диагностики слуха новорожденных на основе генетической связи между формантами звука "а" и резонансной частотой среднего уха.

Analytical relations for clinical preliminary treatment and an audiometry of audition of the human on the basis of the formula gained by the author for argument of norm of a middle ear are tendered. The simple method of preliminary treatment of audition of newborns on the basis of a genetic relation between formants of a sound "a" and resonance frequency of a middle ear is tendered.

Ключевые слова: *среднее ухо, эквивалентная схема, связанные контура, формантные частоты, параметр нормы.*

Введение

Медики развитых стран мира обеспокоены ухудшением слуха человека со дня рождения и связанной с этим задержкой развития речи, а с ней и умственного развития. Это послужило стимулом для разработки универсальных программ скрининга слуха новорожденных с первых дней жизни и использованию всего арсенала средств объективной диагностики слуха, созданных до получения автором формулы для параметра нормы среднего уха [1-4], и очень дорогих: приборов для регистрации слуховых вызванных потенциалов (СВП), отоакустической эмиссии (ОАЭ) разных видов, а также одно- и многочастотной тимпанометрии [5-8]. Однако, проблема дифференциации нарушений между звукопроводящей системой среднего уха и слуховым анализатором (улитка, нервы, отделы мозга) оставалась нерешенной, несмотря на то, что все работы в указанном направлении получали финансовую поддержку по грантам как правительств, так и различных фондов [9]. Напомним, что Нобелевская премия по физиологии и медицине в 1961 г. "за открытие физических механизмов восприятия раздражения улит-

кой" была присуждена венгро-американскому физику Георгу Бекешу (Bekesy).

В 1996 г. начато внедрение единой системы раннего выявления нарушений слуха у детей со дня рождения и в Российской Федерации (методические рекомендации № 96/150 "Единая система аудиологического скрининга", Г.А. Таварткиладзе и соавт.), а также [10,11]. Из-за того, что метод ОАЭ является весьма дорогостоящим и для работы на нем необходим квалифицированный персонал, ОАЭ применяется для скрининга слуха у детей в США, Германии, некоторых регионах Великобритании и ряде других стран [11]. В Бельгии для этих целей используется регистрация СВП. Однако, в большинстве даже экономически развитых стран отсутствуют государственные программы скринингового исследования слуха с применением эффективных методов. Отсутствуют они и в Украине.

В настоящей работе даются примеры того, насколько применение формулы для параметра нормы среднего уха упрощает такие исследования, фактически сводя к нулю возможность диагностической врачебной ошибки.

1. Диагностика на основе формулы для параметра нормы среднего уха

Наиболее распространенным методом объективного исследования слуха является тимпанометрия - измерение зависимости эквивалентного объема среднего уха (мл, cc) от величины относительного статического давления в герметически закрытом наружном слуховом проходе. Графическим изображением является тимпанограмма. Обычно снимают только стандартную (с частотой сигнала 226Гц) тимпанограмму и только по ее виду определяют и норму, и характер нарушений в среднем ухе. На этой частоте эквивалентный объем определяется гибкостью барабанной перепонки. Существуют и двух- или многочастотные тимпанометры, в которых используется для детей частота 1000 Гц, как прибор Capella OAE/middle ear analyzer (ver.2.10 Beta) фирмы Madsen Electronics (Дания) в [8]. В нем скомбинирована диагностика с ОАЭ и тимпанометрия либо на 226, либо на 1000 Гц.

На рис.1 приведены тимпанограммы правого и левого женского уха, полученные с помощью трехчастотного (226, 660, 1000 Гц) импедансметра ZO-2020 фирмы Madsen Electronics. В рамках напечатаны: значение объема наружного слухового прохода – *ear canal volum (ECV)*; значение относительного давления в максимуме тимпанограммы – *tympenic pressure (P)*; значение эквивалентного объема среднего уха – *static compliance*, которое на частоте 226 Гц определяется гибкостью барабанной перепонки, а на резонансной – активной составляющей акустического импеданса; градиент (*G*) в кПа.

Из рис.1 видно, что на частоте 1000 Гц тимпанограмма имеет 2 максимума, из которых первый находится при – 10 дека Па (-100 Па), а второй при не указанном значении. Согласно общепринятой классификации Джергера (1970 г.), кривая при 226 Гц характерна для нормального состояния системы среднего уха, а кривая, такая как при 1000 Гц – для атрофии и рубцовых изменений барабанной перепонки. В действительности же это объясняется тем, что резонансная частота немного меньше 1000 Гц, а становится равной 1000 Гц при уменьшении гибкости с увеличением модуля относительного давления.

Обратим внимание, что:

- истинное значение объема наружного слухового прохода $ECV=1,1 \text{ см}^3$ определяется при частоте 226 Гц ($ECV=1,8 \text{ см}^3$ при 1000 Гц из-за добавления эквивалентного объема пневмопривода);
- значение $ECV=1,1 \text{ см}^3 \cong V_{\text{экр}}(f_p) = 1,2 \text{ см}^3$.

Следовательно, это значение тоже является важным диагностическим параметром для детского и женского уха в норме, который определяется одним числом - фактором нормы [1]:

$$A_{\text{н}} = \frac{V(f_0)}{V(226)} \frac{1}{\sqrt{1 + V_{\text{а.т.т.е}} / V(226)}} = \frac{1,2}{0,79} \frac{1}{\sqrt{1 + 1/0,79}} = 1,03 \quad (1)$$

где объем барабанной полости $V_{\text{б.пол}} \cong 1 \text{ см}^3$.

Для левого уха $V(226)=0,37 \text{ см}^3$, $f_p=1000 \text{ Гц}$, $V(1000)=1,15 \text{ см}^3$:

$$A_{\text{лев}} = \frac{1,15}{0,37} \frac{1}{\sqrt{1 + 1/0,37}} \cong 1,6 \neq 1,$$

т.е. имеется нарушение в среднем ухе.

Близость резонансных частот правого и левого уха в предположении равенства массы слуховых косточек при уменьшении гибкости в 0,79/0,37=2,14 раза указывает на то, что механическая гибкость осталась неизменной, т.е.:

$$V_{\text{пр}}(226) / S_{\text{б.п.пр}}^2 = V_{\text{лев}}(226) / S_{\text{б.п.лев}}^2,$$

откуда:

$$S_{\text{б.п.лев}} = S_{\text{б.п.пр}} \cdot \sqrt{V_{\text{б.п.лев}} / V_{\text{б.п.пр}}} = 0,68 \cdot S_{\text{б.п.пр}},$$

т.е. имеется врожденный дефект левого уха.

Площадь барабанной перепонки правого уха определяется из принципа отражения звука от барабанной перепонки на частоте резонанса, который для площади записывается в виде [2]:

$$S_{\text{б.п.пр}} = 5,8 \frac{\omega_p V(f_p)}{c_0} = 127 \text{ мм}^2. \quad (2)$$

Из проспекта одночастотного (226 Гц) импедансного аудиометра МТ10 фирмы Interacoustics (Дания): $ECV=1,47 \text{ мл}$, $C_a=1,21 \text{ мл}$, $G=114 \text{ декаПа}$ (акустическая гибкость C_a связана с величиной эквивалентного объема среднего уха $V_{\text{экр}}$ соотношением:

$V_{\text{экр}}(226) = \rho \cdot c_0^2 \cdot C_a$, где $\rho=1,2 \text{ кг/м}^3$, $c_0=342 \text{ м/с}$ – удельный вес воздуха и скорость звука в нем, C_a – в $\text{м}^5/\text{Н}$). Считая, что тимпанограмма принадлежит детскому уху ($V_{\text{б.пол}} \cong 0,6 \text{ см}^3$), т.е. вблизи нижней границы интервала значений для человека $0,5\text{--}1 \text{ см}^3$, получим:

$$A = \frac{1,47}{1,21} \frac{1}{\sqrt{1 + 0,6/1,21}} = 1. \quad (3)$$

Знание всех параметров колебательной системы среднего уха позволяет рассчитать коэффициент усиления акустического давления слуховыми косточками от барабанной перепонки в улитку внутреннего уха [3]. Максимальное значение коэффициента $K_{\text{ус}} \cong 115$ (41 дБ) на частоте резонанса при $A=1$ равно потери слуха при разрушении цепи косточек. Частотная зависимость в дБ представляет “аудиологический нуль”, который обычно получают для каждого телефона стандартизацией кривых порога слышимости достаточно большого отически здоровых молодых людей 18-30 лет. При $A \neq 1$ рассчитанные по данным тимпанометрии испытуемого частотные зависимости коэффициента усиления сравниваются с “аудиологическим нулем” и дают кривые потери слуха в звукопроводной системе. Потери в слуховом анализаторе рассчитываются по измерению порогов акустического рефлекса на фиксированных частотах [3].

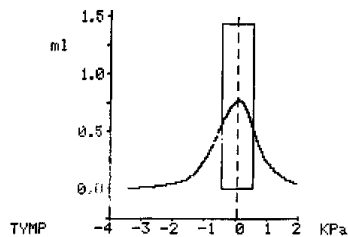
Хорошо известно, что пороги слуховой чувствительности у одного и того же обследуемого не являются абсолютно стабильной величиной. Они зависят от множества внешних факторов, воздействующих на организм человека, а также от функционального состояния самого организ-

ма. В этом можно убедиться, если проводить измерения порогов слышимости через определенные интервалы времени. Для количественной оценки колебаний слуховой чувствительности могут быть использованы стандартные от-

клонения. В [2], где подробно анализировались недостатки субъективной (с участием субъекта) аудиометрии, приведена табл.1 порогов слышимости, полученных в 1975 г.

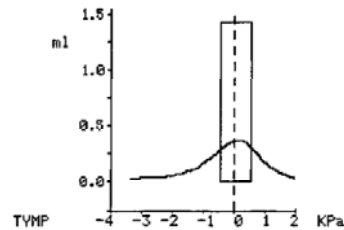
Probe Tone/Ear : 226Hz / Right Ear

Ear Canal Volume	=	1.1 cc
Tympanic Pressure	=	0 daPa
Static Compliance	=	.79 cc
Gradient	=	.28
Pump Speed	=	400 daPa/sec



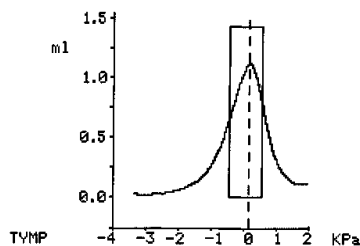
Probe Tone/Ear : 226Hz / Left Ear

Ear Canal Volume	=	1.1 cc
Tympanic Pressure	=	-5 daPa
Static Compliance	=	.37 cc
Gradient	=	.18
Pump Speed	=	400 daPa/sec



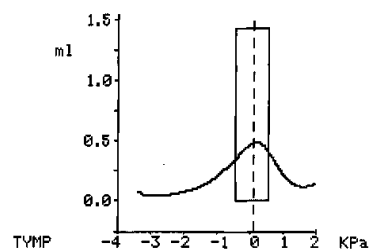
Probe Tone/Ear : 660Hz / Right Ear

Ear Canal Volume	=	1.2 cc
Tympanic Pressure	=	10 daPa
Static Compliance	=	1.16 cc
Gradient	=	.37
Pump Speed	=	400 daPa/sec



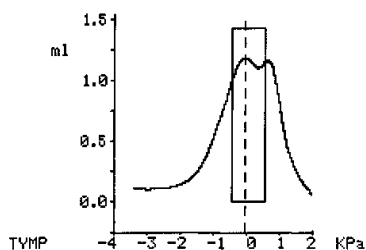
Probe Tone/Ear : 660Hz / Left Ear

Ear Canal Volume	=	1.1 cc
Tympanic Pressure	=	5 daPa
Static Compliance	=	.50 cc
Gradient	=	.23
Pump Speed	=	400 daPa/sec



Probe Tone/Ear : 1000Hz / Right Ear

Ear Canal Volume	=	1.8 cc
Tympanic Pressure	=	-10 daPa
Static Compliance	=	1.22 cc
Gradient	=	.15
Pump Speed	=	400 daPa/sec



Probe Tone/Ear : 1000Hz / Left Ear

Ear Canal Volume	=	1.8 cc
Tympanic Pressure	=	20 daPa
Static Compliance	=	1.16 cc
Gradient	=	.30
Pump Speed	=	400 daPa/sec

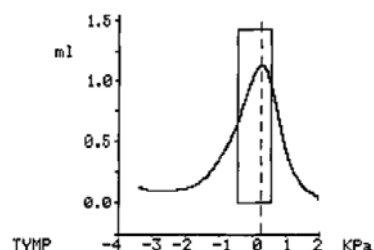


Рис.1. Тимпанограммы правого (а) и левого (б) женского уха

Отмечается, что у нормально слышащих наибольший разброс порогов слышимости наблюдается на высоких частотах. У больных отосклерозом величина колебаний в среднем соответствует значениям, полученным в норме в диапазоне частот 1000-8000 Гц, и равномерна

на всех частотах. У больных с нейросенсорной тугоухостью I группы колебания равномерны на всех частотах и превышают колебания у лиц с отосклерозом, и лиц с нормальным слухом. Во II группу включены больные, у которых снижение слуха составило в среднем 25 дБ в диапазоне

125-2000 Гц и 60 дБ на частоте 4000 Гц. Подобные результаты ранее в литературе автору не встречались. Обратим внимание на то, что из равномерного по частотам характера отклонений выпадают для первых трех категорий об-

следуемых колебания на частоте 1000 Гц: у нормально слышащих для σ наблюдается четкий максимум, а у больных отосклерозом и нейросенсорной тугоухостью I группы, наоборот, минимум.

Таблица 1

Форма тугоухости	Стандартные отклонения в дБ ($\pm \sigma$) на частотах (Гц)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Нормально слышащие	5,2	4,6	4,1	8,2	6,5	6,4	7,5
Отосклероз	7,8	6,1	7,0	6,2	6,7	6,8	7,5
Нейросенсорная тугоухость:							
I группа	8,6	8,7	8,5	8,1	8,5	8,9	8,4
II группа	10,9	8,8	9,0	6,6	6,2	5,3	-

Легко показать, что отклонение порога слышимости в дБ от среднего для нормально слышащих равно:

$$\Delta(\text{дБ}) = 20 \cdot \log\left(1 + \left(\Delta p / p_{\text{пор}}(f)\right)\right) = 8,2 \text{ дБ.}$$

Откуда:

$$1 + \left(\Delta p / p_{\text{пор}}(f)\right) = 2,58, \text{ или } |\Delta p| / p_{\text{пор}}(f) = 1,58.$$

Это значение близко к $V(f_p) / V(226) = 1,52$ в (1).

2. Диагностика по спектру звука “а”

Как было обнаружено в [2], наиболее выступающей формантой звука “а” женского голоса является вторая ($\cong 1000$ Гц), а не первая (660-700 Гц) как мужского и, как считалось, и женского голоса. Было установлено, что резонансная частота среднего уха в норме близка к частоте наиболее выступающей форманты звука “а”: первой у мужчин и второй у женщин. Это создает основу для нового экспресс метода контроля уха.

Многочисленными физиологическими исследованиями установлено, что слуховой рецептор уже функционирует к моменту рождения ребенка, в то время как созревание височной области коры головного мозга продолжается до 5-6 летнего возраста [10].

Метод очень прост. При рождении ребенка на портативном магнитофоне записывается крик ребенка при рождении. Это звук поиска матери, заложенный генетически. Главным условием записи является отсутствие нелинейных искажений. Этот звук записывается и у матери и в дальнейшем может служить как индикатор состояния слуха, особенно при приеме антибиотиков (ототоксические запрещены Минздравом Украины), для определения параметров слухового аппарата сразу же после обнаружения де-

фекта слуха. Отметим, что в [2] исследовались в домашних условиях по двум программам спектры дочери, матери и отца. Записанный звук подается на персональный компьютер со звуковой картой и по программе записывается спектр, желательно двухмерный (частота-время). Целесообразно использовать индивидуальные спектры и в методиках развития устной речи у глухих и слабо слышащих детей с использованием сурдопедагогических приборов: полифонаторов и слухо-речевых тренажеров.

При анализе слуховых аппаратов, автором было обращено внимание на то, что аналоговые аппараты с регулировкой частотной характеристики с помощью простых акустических элементов, подобранных эмпирически и измеренных производителями, очень близки к характеристикам эквивалентного объема среднего уха. Можно высказать предположение, что слуховые аппараты с такой характеристикой увеличивают контрастность частотной структуры сигналов для восстановления отражения формантной структуры звуков на выходе внутреннего уха с нарушенными механизмами обратной связи, как моделируется в [13].

Выводы

1. Рассмотрены формулы диагностики и аудиометрии слуха на основе формулы для параметра нормы среднего уха с помощью существующих тимпанометров.

2. Обнаружено, что при состоянии среднего женского и детского уха в норме объем наружного слухового прохода равен эквивалентному объему уха на частоте резонанса, что позволяет определять параметр нормы и объем барабанной полости даже с помощью одночастотного (226 Гц) тимпанометра.

3. Обнаружено, по литературным данным измерений колебаний порогов слуховой чувствительности в зависимости от частоты при $f=1000$ Гц, максимум размаха у нормально слышащих и минимум у пациентов с отосклерозом и сенсоневральными нарушениями I группы (снижение слуха в среднем 25 дБ в диапазоне 125-200 Гц и 60 дБ на частоте 4000 Гц). Показано, что размах колебаний порога чувствительности у одного субъекта для акустического давления на частоте резонанса равен добротности среднего уха. Это представляет метод диагностики на функциональном уровне (обратимом) уровне.

4. Рассмотрена возможность диагностики слуха новорожденных и детей и дальнейшего контроля слуха по спектру звука "а".

Литература

1. *Найда С.А.* Формула середнього вуха людини в нормі. Відбивання звуку від барабанної перетинки // Акустичний вісник.-2002.-№ 3.-С.46-51.
2. *Найда С.А.* О генетической связи между формантами звука "а" и "у" и резонансной частотой среднего уха в норме//Электроника и связь.-2002.-№ 17. -С.7-11.
3. *Найда С.А.* Частотные характеристики коэффициента усиления звукового давления слуховыми косточками и акустического рефлекса // Электроника и связь.-2003.-№ 19.-С.11-16.
4. *Найда С.А.* О возможности одноканальной динамической пассивной акустотермометрии головного мозга и улитки внутреннего уха новорожденных с помощью фокусированного ультразвука//Электроника и связь.-2003.-№18.-С.9-10.
5. *Keefe D.H.* Introduction to the use of acoustic reflectance and admittance to assess middle-ear status in neonates// Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - May 30 - June 1, 2002.
6. *Keefe D.H., Gorga M.P., Neely S.T., Zhao F., Vohr B.* Using middle-ear measurements to interpret cochlear, sensorineural, and behavioral responses in a study of neonatal hearing impairment// Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - May 30 - June 1, 2002.
7. *Shahnaz N.* Multifrequency, multicomponent tympanometry in 3-weeks old infants// Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - May 30 - June 1, 2002.
8. *Kei J., Allison-Levick J., Dockray J., Harrys R., Kirkegard C., Wong J., Maurer M., Hegarty J., Young J., Tudehope D.* High frequency (100 Hz) tympanometric findings in neonates: a normative study// Proc. International Conf. - Villa Erba (Como), Italy. - May 30 - June 1, 2002.
9. Engineering in Medicine and Biology.-1996. - V.15, № 5.-P.125.
10. *Володин И.Н., Таварткиладзе Г.А., Козунь Ю.В.* Выявление патологии органа слуха в системе медицинского обеспечения детей раннего возраста// Российский вестник перинатологии и педиатрии. -2000. -№ 5.-С.20-24.
11. *Королева И.В., Ланцова А.А., Подосинникова Г.А.* Опыт организации системы раннего выявления и реабилитации детей с нарушениями слуха в Санкт-Петербурге// Вестник оториноларингологии. -2000. -№ 3.-С.23-27.
12. *Розенблюм А.С., Цирюльников Е.М.* Новые методы диагностики нарушений слуха.-Л.:Ленинградский восстановительный центр ВОГ,1986.-50с.
13. *Бабкина Л.И., Молчанов А.П.* Особенности отображения частотной структуры сигналов в периферическом отделе слухового анализатора в норме и патологии// Вестник оториноларингологии. -2000. -№ 3.-С.28-30.